

Рис. 3. Распределения дифференциальных величин:  
(а) по длине индуктора некомпенсированного и (б) по длине индуктора  
компенсированного ЛАД

#### Список использованных источников

1. Веселовский О. Н., Коняев А. Ю., Сарапулов Ф. Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Мишин В. И., Чуенко Р. Н., Гаврилюк В. В. Эффект внутренней компенсации реактивной мощности в асинхронном электродвигателе // Электротехника. № 8. 2010. С. 30–36.
3. Мугалимов Р. Г., Губайдуллин А. Р., Мугалимова А. Р. Электроприводы на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности для волочильных станков. // Электротехника. 2009. № 10. С. 122–127.

**Ю. М. Денчик, М. С. Давыдов,**  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»  
(г. Новосибирск, Россия)

**Н. А. Ковалева,**

## ОЦЕНКА ГАРМОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ 6–10 кВ

Несинусоидальность напряжения как вид искажения, обусловленный нелинейной нагрузкой, представляет наибольшую опасность для региональных электроэнергетических систем (ЭЭС) с недостаточно мощным интегральным показателем (полной мощностью трехфазного короткого замыкания  $S_k$ , МВА). Качество функционирования систем электроснабжения общего назначения (СЭС) заметно снижается, если [1]

$$(S_k/S_n) < 50, \quad (1)$$

где  $S_n$  – суммарная нелинейная нагрузка, преимущественно состоящая из вентильных преобразователей, МВА.

При несинусоидальном напряжении появляются кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи (ЭМП) по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения ( $K_U$ ) и по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения ( $K_{U(n)}$ ). Из-за этого обостряется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств.

Для определения этих помех используются показатели качества электроэнергии ( $K_U$ ,  $K_{U(n)}$ ), полученные с помощью измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) типа ИВК «Омск-М», АКЭ-823 и др., в течение расчетного времени (24 ч). При этом коэффициент  $K_U$  имеет признаки интегрального характера, так как обуславливается всеми высшими гармоническими составляющими, поэтому в значительной степени определяет электромагнитную обстановку (ЭМО) в СЭС общего назначения. В связи с этим в данной статье излагается алгоритм определения кондуктивной низкочастотной ЭМП по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения.

ГОСТ 32144-2013 установлены нормально допустимое значение [ $K_{U(n)}$ , %] и предельно допустимое значение [ $K_{U(n)}$ , %]. При этом ЭМС обеспечивается в том случае, если усредненные (интегрированные) оценки  $K_U$  не выходят за предельно допустимый уровень, а в течение не менее 95 % времени каждых суток не выходят за пределы нормально допустимого значения. Нормально допустимые и предельно допустимые значения этих коэффициентов указаны соответственно в таблицах 4 и 5 [1] для сетей (0,4–220) кВ.

Величина  $K_U$  является непрерывно распределенной случайной величиной, зависящей от многих случайных событий. Измеренные ИВК за расчетный период значения  $K_U$  и усредненные по интервалам образуют множество

$$\begin{pmatrix} K_{U1}, & K_{U2}, & K_{U3}, & \dots, & K_{Ui}, & \dots, & K_{Un} \\ P_1, & P_2, & P_3, & \dots, & P_i, & \dots, & P_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $K_{U1}, K_{U2}, K_{U3}, \dots, K_{Ui}, \dots, K_{Un}$  – различные значения коэффициента  $K_U$  в течение суток, %;  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_n$  – вероятности появления значений этого коэффициента.

Это множество является полем событий, в котором содержатся как нормально допустимые (достоверные) значения, так и нестандартные значения, которые не отображают ЭМО в сети [2].

Процесс возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения представляется математической моделью

$$K_U [P(K_{U,n} < K_U < K_{U,n}) > 0,05; P(K_{U,n} < K_U < \infty) \neq 0] \subset \delta K_U, \quad (3)$$

где  $\delta K_U$  – кондуктивная низкочастотная ЭМП по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения, %.

Таким образом, кондуктивная ЭМП  $\delta K_U$  появляется в сети тогда, когда вероятность нахождения величины  $K_U$  в течение суток в пределах  $(K_{U,n}; K_{U,n})$  превышает 0,05, а в пределах  $(K_{U,n}; \infty)$  не равна нулю. Помеха появляется также при выполнении только одного условия.

Интегральная функция распределения случайной величины  $K_U$  в интервале  $(K_{U,n}; K_{U,n})$  определяется по формуле

$$P(K_{U,n} < K_U < K_{U,n}) = \int_{K_{U,n}}^{K_{U,n}} \psi(K_U) d(K_U), \quad (4)$$

где  $\psi(K_U)$  – плотность вероятности распределения величины  $K_U$  в течение суток, 1/%.

Такая же функция распределения в интервале  $(K_{U,n}; \infty)$  рассчитывается по формуле

$$P(K_{U,n} < K_U < \infty) = \int_{K_{U,n}}^{\infty} \psi(K_U) d(K_U). \quad (5)$$

Значения  $K_{U,i}$  являются дискретными случайными величинами, заданными действительными (вещественными) числами. Это позволяет использовать производящую функцию для определения моментов распределения и плотности вероятностей распределения случайной величины  $\delta K_U$ . Для этого доказано [2, 3], что, если принять

$$\delta K_U = \exp[t \cdot K_U], \quad (6)$$

где  $t$  – параметр (время), то математическое ожидание величины  $\delta K_U$  является производящей функции случайной величины  $K_U$ .

На основании теоремы о равенстве начальных моментов и следствия о равенстве центральных моментов распределения непрерывной случайной величины и ее производящей функции имеем равенства [5]

$$M[K_U] = M[\delta K_U], \quad (7)$$

$$\sigma[K_U] = \sigma[\delta K_U], \quad (8)$$

где  $M[K_U]$ ,  $M[\delta K_U]$  – математическое ожидание соответственно величины  $K_U$  и  $\delta K_U$ , %;

$\sigma[K_U]$ ,  $\sigma[\delta K_U]$  – средние квадратические отклонения этих же величин, %.

Следствия из теоремы единственности и теоремы непрерывности теории производящих функций позволяют записать

$$\psi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\} = \psi\{\delta K_U, M[\delta K_U], \sigma[\delta K_U]\}, \quad (9)$$

где  $\psi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\}$  – плотность вероятности распределения случайной величины  $K_U$ , 1/%;

$\psi\{\delta K_U, M[\delta K_U], \sigma[\delta K_U]\}$  – тоже величины  $\delta K_U$ , 1/%

Вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $K_U$  определяется по формуле

$$P(\delta K_U) = P(K_{U,n} < K_U < K_{U,n}) + P(K_{U,n} < K_U < \infty) - 0,05. \quad (10)$$

Полученные параметры распределения этой ЭМП ( $M[\delta K_U]$ ,  $\sigma[\delta K_U]$ ) и вероятность ее появления за расчетный период позволяют представить последовательность решения задачи по определению критерия качества функционирования СЭС общего назначения (рисунок 1) по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения.

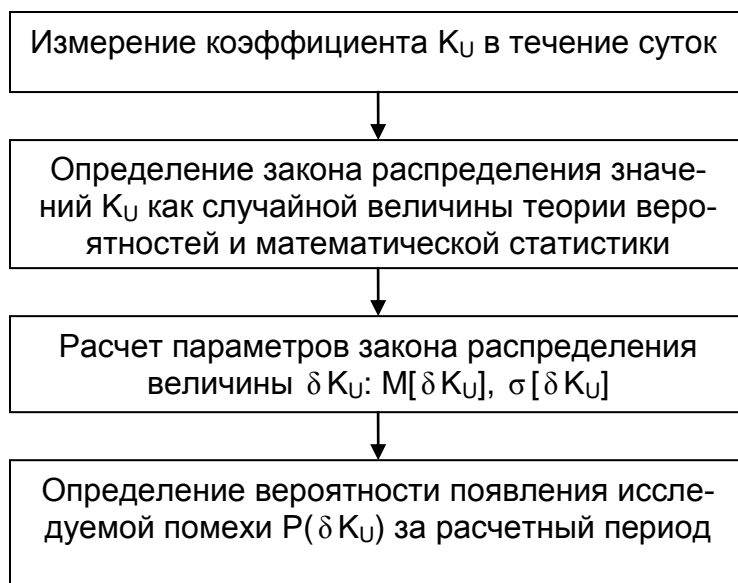


Рис. 1. Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения

Эффективность использования предложенного алгоритма для анализа ЭМО рассмотрим на примере расчета параметров кондуктивной ЭМП  $\delta K_U$  в узле нагрузки сети 6 кВ удаленного ресурсодобывающего региона. ИВК показал, что эмпирическое распределение значений коэффициента  $K_U$  в течение суток соответствует нормальному закону распределения теории вероятностей. Параметры распределения значений этого коэффициента составляют: математическое ожидание  $M[K_U] = 5,63$  %; среднее квадратическое отклонение  $\sigma[K_U] = 1,5$  %; относительное значение времени превышения нормально допустимого значения  $T_1 = 60$  %; относительное значение времени превышения предельно допустимого значения  $T_2 = 4$  %.

Нормальная плотность вероятности распределения кондуктивной низкочастотной ЭМП  $\delta K_U$  (1/% ) определяется равенством

$$\varphi\{K_U = \delta K_U; 5,63; 1,5\} = 0,27 \exp \left[ -\frac{(K_U - 5,63)^2}{4,5} \right]. \quad (11)$$

Требования ГОСТ 32144-2013 не выполняется. В связи с этим определяется вероятность появления кондуктивной ЭМП  $\delta K_U$ . На рисунке 2 приведен график нормальной плотности вероятности распределения  $\varphi\{K_U = \delta K_U; 5,63; 1,5\}$ , совмещенный с нормируемыми значениями уровней ЭМС для кондуктивной ЭМП по коэффициенту  $K_U$  в электрической сети 6 кВ. Вероятности попадания  $K_U$  в пределы  $(5,8)$  и  $(8, \infty)$ , рассчитанные по формулам (4) и (5) с помощью функции Лапласа, составляют 0,6

и 0,06 соответственно. Вероятность появления  $\delta K_U$  в течение суток, рассчитанная по формуле (10), составляет 0,61.

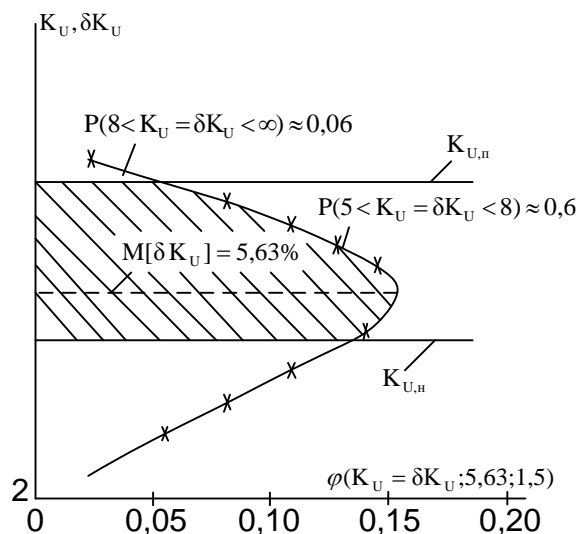


Рис. 2. График нормальной плотности вероятности распределения  $\varphi(K_U = \delta K_U; 5,63; 1,5)$  совмещенный с нормируемыми значениями уровней ЭМС для кондуктивной низкочастотной ЭМП  $\delta K_U$  в сети 6 кВ

Таким образом, гармоническое воздействие определяет ЭМО в сети 6 кВ. Кондуктивная низкочастотная ЭМП  $\delta K_U$  формируется значениями коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, превышающими 5 %, и характеризуется с вероятностью 0,95 математическим ожиданием  $M[\delta K_U] = 5,63 \%$  и средним квадратическим отклонением  $\sigma[\delta K_U] = 1,5\%$ . Вероятность  $P(\delta K_U)$  превышает (0,61) допустимую вероятность (0,05) превышения коэффициентом  $K_U$  нормально допустимого значения в 12,2 раза.

#### Список использованных источников

1. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, МЕО). М.:Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. Данилов Г. А. Повышение качества функционирования линий электропередачи Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2013. 559 с.
3. Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах /Е.В.Иванова; под ред. В.П.Горелова, Н.Н.Лизалека. Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2006. 432 с.